

Sertifikat Apresiasi diberikan kepada

Andy Prabowo, Ph.D.

Atas bantuannya dalam menyusun
dokumen **TATA CARA MENGHITUNG
KEKUATAN LENTUR BALOK BAJA NIRKARAT
CANAI DINGIN BERLUBANG MENGGUNAKAN
METODE DESAIN KEKUATAN LANGSUNG
(DIRECT STRENGTH METHOD)**



Dr. Ir. Usman Wijaya, S.T., M.T.
Direktur PT. DeltaKoni

22 Agustus 2023

**TATA CARA MENGHITUNG KEKUATAN LENTUR BALOK BAJA
NIRKARAT CANAI DINGIN BERLUBANG MENGGUNAKAN METODE
DESAIN KEKUATAN LANGSUNG (*DIRECT STRENGTH METHOD*)**

Disusun oleh:
Andy Prabowo, S.T., M.T., Ph.D.



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS TARUMANAGARA
Agustus 2023**

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Salah satu material baja yang tersedia di pasaran memiliki sifat tahan karat, yang dikenal sebagai baja tahan karat (*stainless steel*). Material semacam ini dapat digunakan untuk memfabrikasi profil baja canai-dingin (*cold-formed steel*). Baja tahan karat memiliki kandungan nikel dan kromium yang dapat menghalangi oksidasi lanjut untuk mencegah munculnya karat. Dengan demikian, penggunaan baja tahan karat menjadi relatif lebih murah dibandingkan baja karbon karena baja tahan karat tidak memerlukan biaya pengecatan sebagai upaya mengurangi timbulnya karat selama umur pemakaiannya (Oentoeng, 2000). Hal ini juga menjadikan biaya perawatan struktur baja tahan karat relatif murah akibat dari kemampuan durabilitasnya.

Sifat-sifat mekanis dari baja tahan karat menunjukkan kecocokan sebagai bahan untuk konstruksi bangunan (Romli, 2013). Sifat-sifat mekanis itu tersebut yaitu tidak terbatas pada kekuatan tarik, elongasi, ketahanan korosi, kemampuan las, ketahanan panas, kekerasan, kekuatan tekan, kekuatan bentur, kekuatan lentur, kekuatan leleh, ketahanan aus dan sifat peredam getaran. Dibandingkan dengan baja karbon, baja tahan karat berkinerja jauh lebih baik dalam hal ketahanan api dan mempertahankan kekuatan dan kekakuan pada temperatur ekstrim (Lai et al., 2012).

Sifat mekanis material baja tahan karat sangat berbeda dengan sifat material baja karbon, terutama pada kekuatan dan daktilitasnya. Untuk baja karbon dan baja paduan rendah, batas proporsionalnya diasumsikan minimal 70% dari titik leleh, tetapi untuk baja tahan karat batas proporsional berkisar antara 36% hingga 60% dari kekuatan leleh (Chen & Young, 2006). Oleh karena itu, spesifikasi perhitungan desain struktur yang terfabrikasi dari baja karbon tidak dapat diadopsi langsung oleh baja tahan karat tanpa adanya penyesuaian, seperti pada perhitungan kekuatan struktur pada temperatur tinggi.

Baja tahan karat mempunyai beberapa macam jenis. Salah satu kelas yang paling banyak digunakan adalah austenitic (EN 1.4301), khususnya pada peralatan rumah tangga dan otomotif. Baja tahan karat austenitic mengandung sekitar 0,03% karbon, 18% kromium dan 8% nikel, sehingga baja tahan karat tersebut memiliki sifat ductility, weldability dan ketahanan korosi yang baik (Huang et al., 2021) untuk dimanfaatkan sebagai material struktur.

Berbeda dengan austenitic, baja tahan karat lean duplex (EN 1.4162) memiliki kelebihan pada kekuatan dan biaya pelaksanaan yang menjadikannya cocok sebagai alternatif material konstruksi bangunan. Baja tahan karat ini memiliki harga yang lebih rendah serta kekuatan material yang tidak jauh berbeda dibandingkan baja tahan karat duplex (Huang & Young, 2014) yang terlebih dahulu ada di pasaran. Baja tahan karat lean duplex terdiri dari 0,03% karbon, 21% kromium, 1,5% nikel, 0,3% molibdenum, 0,22% nitrogen dan 4,5% mangan (Francis & Byrne, 2021).

Melihat perkembangan penelitian yang ada, maka penggunaan panduan struktur baja nirkarat menjadi sebuah keniscayaan. Namun, panduan menghitung kekuatan struktur baja nirkarat khususnya yang digunakan sebagai struktur balok belum ada hingga saat ini. Dengan demikian, diperlukan adanya dokumen yang berisi mengenai petunjuk perhitungan sebagai

bentuk dari teknologi tepat guna (TTG). TTG ini dapat dijadikan pedoman bagi perancang struktur bangunan teknik sipil yang ingin menerapkan menggunakan struktur baja nirkarat. Pedoman perhitungan yang diberikan pada TTG ini didasarkan dari peraturan desain ASCE-8 (2021) serta hasil penelitian yang dilakukan oleh Jonathan (2022) dan Priestley (2022). Pedoman perhitungan ini sangat cocok untuk mendesain struktur balok dengan atau tanpa lubang yang berada pada kondisi ruangan pada suhu 22-900°C.

1.2. Tujuan

Pedoman TTG ini bertujuan untuk:

1. Memberikan petunjuk perhitungan kekuatan lentur balok baja nirkarat dengan atau tanpa lubang menggunakan *Direct Strength Method* (DSM) pada temperatur 22-900°C;
2. Memberikan petunjuk menggunakan program bantu CUFSM dalam kaitannya menggunakan prinsip DSM.

1.3. Manfaat

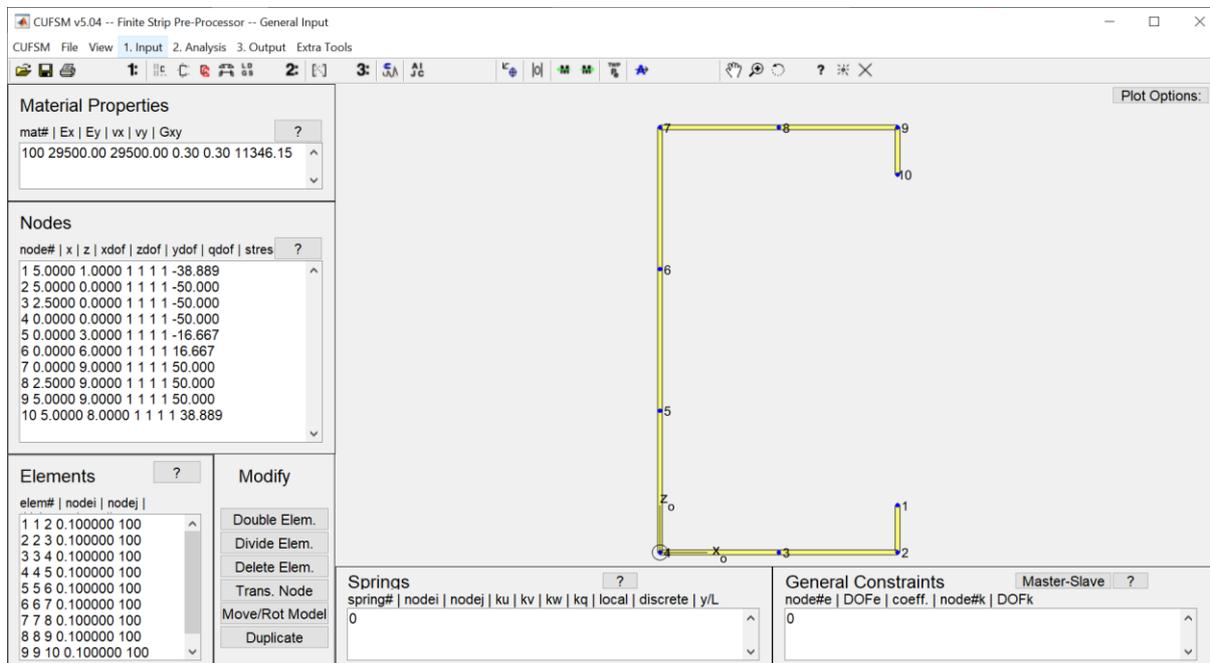
Manfaat yang ingin dicapai dari dibuatnya dokumen TTG ini adalah agar para perancang struktur lebih mengenal metode perhitungan kekuatan balok pada struktur baja nirkarat canai dingin dengan lubang sehingga dapat memberikan keamanan bagi pengguna struktur.

BAB II PETUNJUK MENGGUNAKAN PROGRAM BANTU CUFSM

2.1. Pengantar

Program bantu CUFSM dikembangkan dari hasil penelitian Schafer & Adány (2006) untuk menghitung kapasitas tekuk (lokal, distortional, dan lentur) elastik dari penampang baja canai dingin. Output dari program ini digunakan untuk menghitung kekuatan aksial dan lentur murni pada dengan memperhitungkan kombinasi tekuk lokal dan global. Prinsip perhitungan menggunakan *finite strip method* (FSM) yang merupakan cikal bakal dari metode *finite element*. Data yang diperlukan untuk menggunakan program CUFSM yaitu:

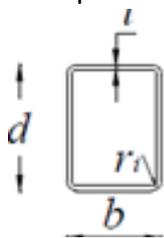
- Ukuran penampang
- Properti material
- Panjang batang yang dianalisis



Gambar 1. Penampilan *user interface* pada program CUFSM

2.2. Contoh menggunakan program CUFSM

Data profil:



$d = 300 \text{ mm}$; $b = 120 \text{ mm}$; $t = 2 \text{ mm}$; $r_i = 4.5 \text{ mm}$

$f_y = 519.390 \text{ MPa}$; $E = 159315.03 \text{ MPa}$; $G = 61275.01 \text{ MPa}$

$L_b = 1400$

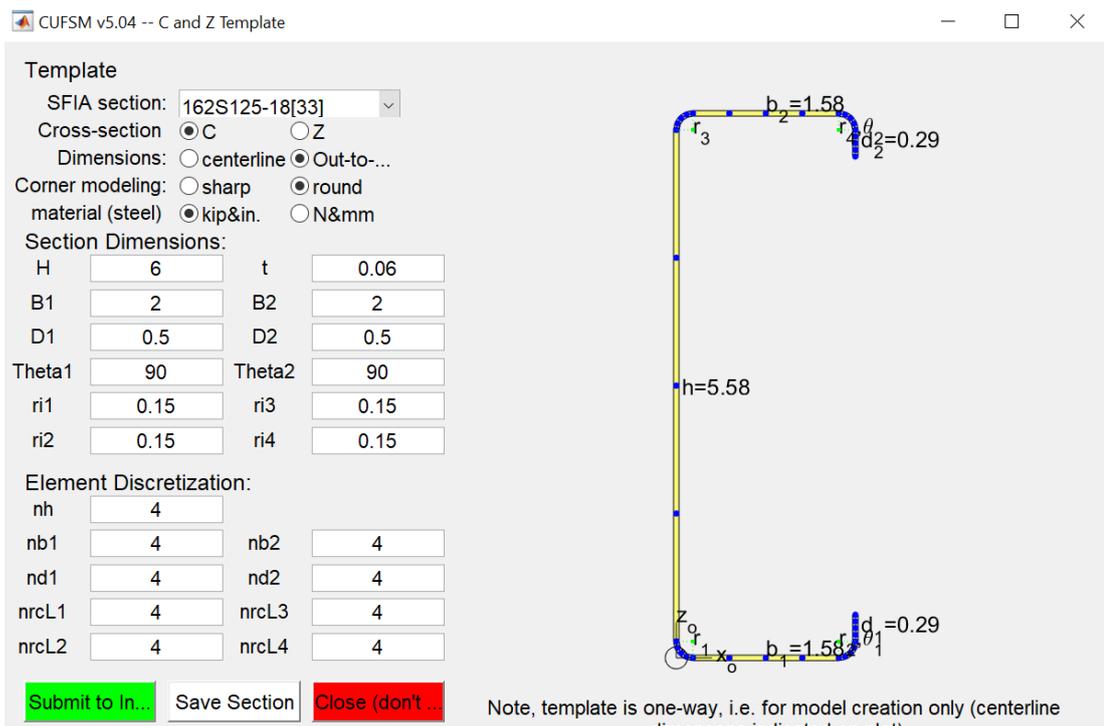
Catatan: nilai f_y , E , dan G diperoleh dari nilai reduksi mengacu pada hasil penelitian yang ada untuk temperatur di atas temperatur ruangan (Chen & Young, 2006; Huang & Young, 2014)

Langkah-langkah menginput data:

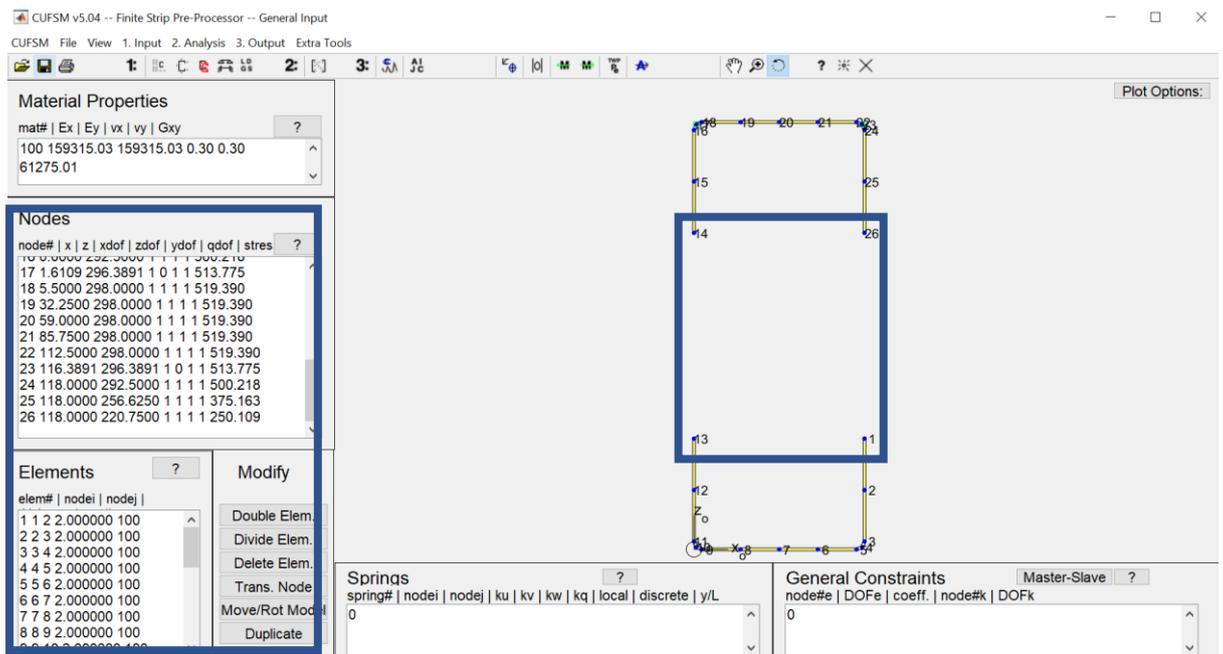
1. Input geometri



Penampilan input geometri dalam satuan mm sebagai berikut:

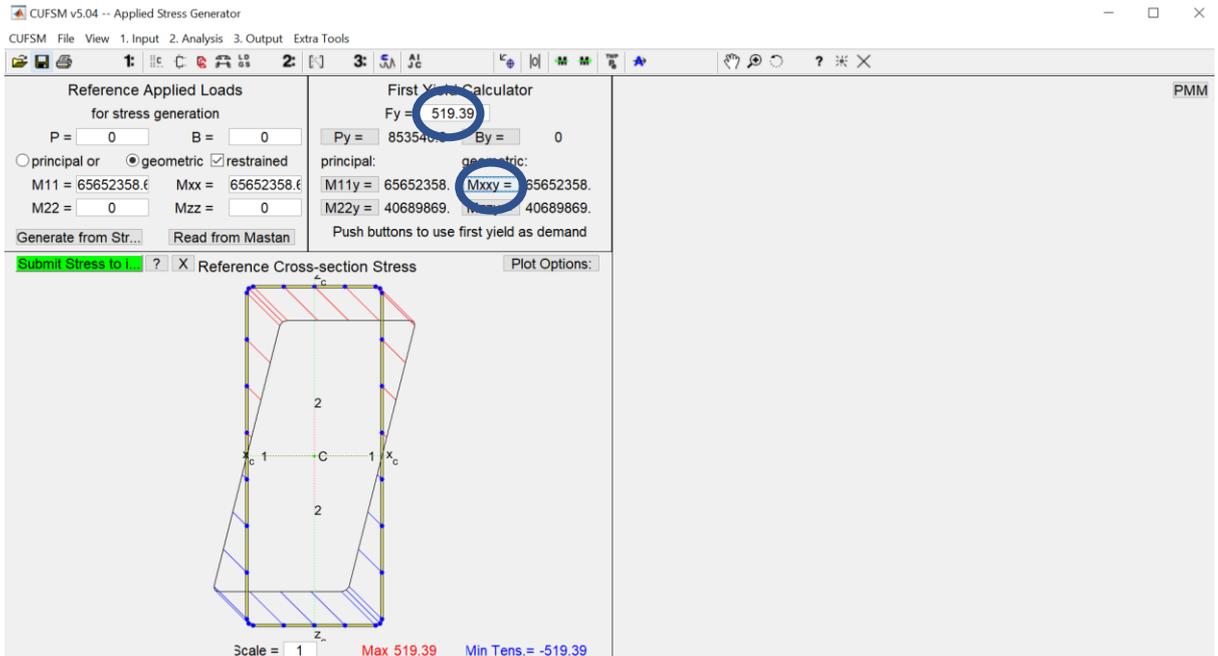


Catatan tambahan: untuk balok berlubang maka perlu dilakukan revisi input koordinat titik-titik yang membentuk penampang berlubang. Revisi dapat berupa menghapus nomor "element" dan atau "nodes". Nomor "nodes" di daerah belokan di bagian atas perlu diubah nilai z-dof-nya menjadi 0.

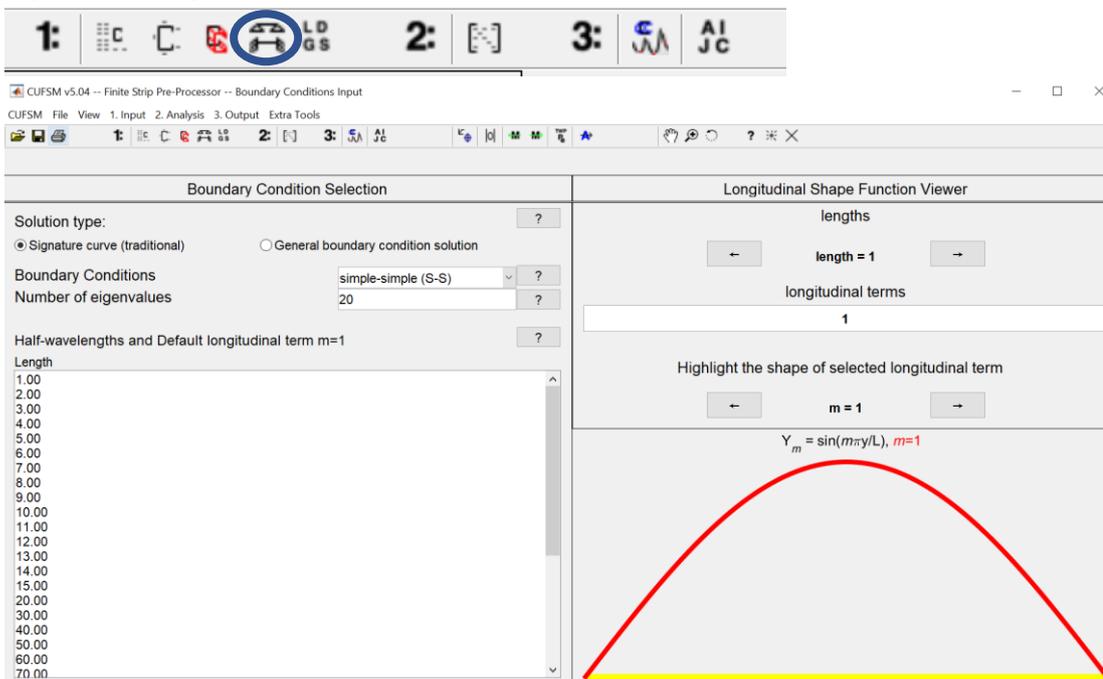


2. Input tegangan lentur ijin maksimal (f_y)





3. Input *boundary conditions*:



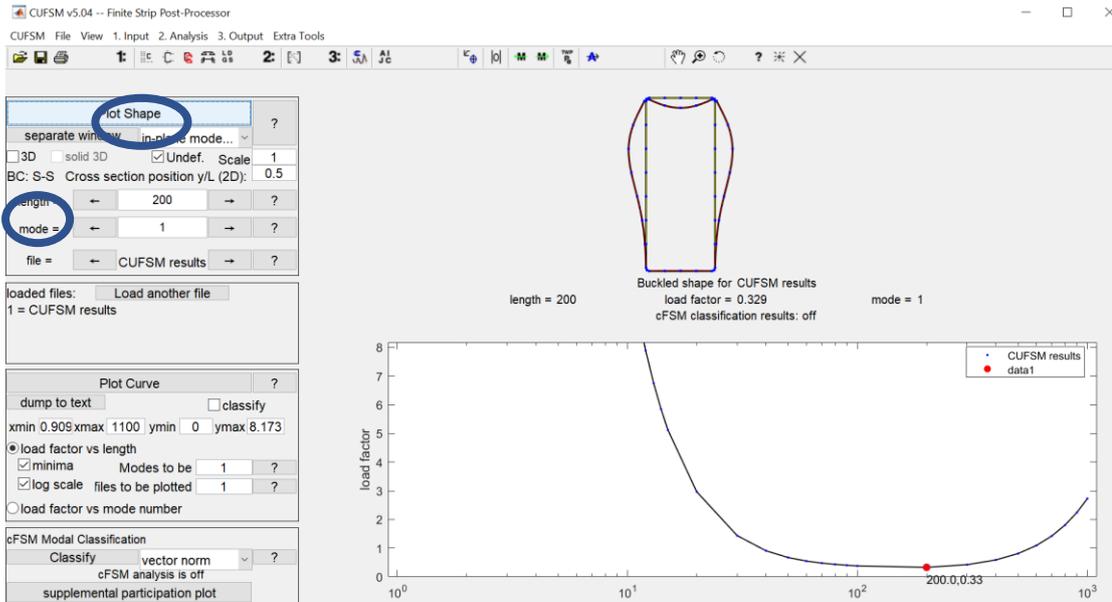
4. Jalankan analisis menggunakan simbol di sebelah angka 2:



5. Lihat hasil analisis:

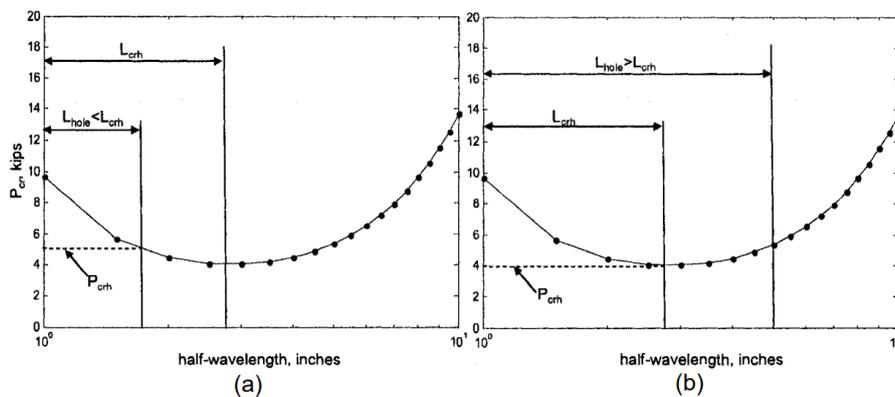


Isi panjang tekuk (lokal) elastis (L_{cr1}) pada kolom *length* dan perbaharui gambar *failure mode* melalui tombol "*plot shape*"



6. Baca nilai M_{cr1} (momen tekuk lokal elastis) pada *load factor*. Nilai ini perlu dikalikan dengan f_y untuk memperoleh nilai M_{cr1} dalam satuan momen. Apabila yang dianalisis adalah penampang terbuka seperti penampang C atau I, maka perlu dilihat juga nilai momen tekuk distorsional elastis (M_{crd}).

7. Pada penampang RHS berlubang, nilai load factor diambil sesuai kondisi berikut: apabila diameter lubang lebih kecil dari panjang tekuk lokal elastik (L_{cr1}), maka digunakan load factor yang bersesuaian dengan diameter lubang. Apabila diameter lubang lebih besar dari L_{cr1} , maka digunakan load factor yang bersesuaian dengan L_{cr1} . Nilai M_{cr1} pada penampang RHS berlubang dibatasi dengan nilai M_{cr1} pada penampang RHS tanpa lubang sehingga diambil nilai M_{cr1} yang terkecil antara penampang RHS tanpa lubang dan penampang RHS berlubang. Gambar 1 mengilustrasikan prosedur untuk memperoleh nilai M_{cr1} pada penampang RHS berlubang (M_{crh}), dengan nilai P_{crh} dianggap sebagai nilai M_{crh} .



Gambar 1. Kurva tekuk elastis lokal penampang bersih ketika (a) diameter lubang kurang dari L_{crh} dan (b) ketika diameter lubang lebih besar dari L_{crh} (Moen & Schafer, 2010)

BAB III PETUNJUK MENGHITUNG KEKUATAN LENTUR BALOK BERLUBANG

3.1. Berdasarkan Tekuk Global

$$M_{ne} = S_{fc} \times F_n \leq M_y \quad (1)$$

$$M_y = S_f \times F_y \quad (2)$$

Keterangan:

M_{ne} : momen nominal untuk leleh dan tekuk global (kNm)

M_y : momen leleh (kNm)

S_f : modulus elastis penampang baja *cross-section* yang tidak tereduksi relatif terhadap serat ekstrim pada pelelehan pertama (mm³)

S_{fc} : modulus elastis penampang yang tidak tereduksi penuh relatif terhadap serat tekan ekstrim (mm³)

Nilai F_n ditentukan sebagai berikut:

$$\text{Untuk } \lambda_e \leq \beta_0 \rightarrow F_n = f_y \quad (3)$$

$$\text{Untuk } \beta_0 \leq \lambda_e \leq 1,6 \rightarrow F_n = 1,2 \left(\beta_1 \lambda_e^\alpha \right) f_y \quad (4)$$

$$\text{Untuk } \lambda_e > 1,6 \rightarrow F_n = \beta_2 F_{cre} \quad (5)$$

$$\lambda_e = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cre}}} \quad (6)$$

Keterangan:

F_{cre} : tegangan tekuk torsi-lateral kritis pada penampang tanpa lubang (kN)

α : koefisien tekuk global

β_0 : koefisien tekuk global

β_1 : koefisien tekuk global

β_2 : koefisien tekuk global

Tabel 1 Koefisien Tekuk Global (ASCE-8, 2021)

Jenis baja	α	β_0	β_1	β_2
<i>Austenitic dan duplex</i>	1,44	0,35	0,44	0,61
<i>Ferritic</i>	1,55	0,41	0,49	0,70

Nilai F_{cre} ditentukan sebagai berikut:

$$F_{cre} = \frac{C_b \times r_o \times A}{S_{fc}} \times \sqrt{\sigma_{ey} \times \sigma_t} \quad (7)$$

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_o^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 \times E}{\left(K_y \times \frac{L_y}{r_y}\right)^2} \quad (9)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A \times r_o^2} \times \left[G \times J + \frac{\pi^2 \times E \times C_w}{(K_t \times L_t)^2} \right] \quad (10)$$

Keterangan:

- A : luas penampang penuh yang tidak tereduksi (mm²)
- C_b : faktor modifikasi tekuk torsi-lateral
- C_w : konstanta melengkung torsional (mm⁴)
- E : modulus elastisitas baja tahan karat (MPa)
- G : modulus geser baja tahan karat (MPa)
- J : konstanta torsi (mm⁴)
- K_t : faktor panjang efektif untuk tekuk torsi
- K_y : faktor panjang efektif untuk tekuk torsi lentur terhadap sumbu y
- L_t : panjang komponen struktur *unbraced* secara torsi (mm)
- L_y : panjang komponen struktur *unbraced* secara lateral terhadap sumbu y (mm)
- r_o : radius girasi polar terhadap pusat geser (mm)
- r_x : radius girasi terhadap sumbu x (mm)
- r_y : radius girasi terhadap sumbu y (mm)
- S_{fc} : modulus elastis penampang yang tidak tereduksi penuh relatif terhadap serat tekan ekstrim (mm³)
- x_o : koordinat pusat geser terhadap pusat berat (mm)
- σ_{ey} : tegangan efektif terhadap sumbu y (MPa)
- σ_t : tegangan terhadap tekuk torsi (MPa)

Catatan: Tekuk global yang dipengaruhi oleh perilaku torsi tidak terjadi pada balok dengan penampang simetris, sehingga besarnya nilai $M_{ne} = M_y$.

3.2. Berdasarkan Tekuk Lokal berinteraksi dengan Tekuk Global (metode DSM) menurut ASCE-8 (2021)

$$\text{Untuk } \lambda_l \leq 0,667, M_{nl} = M_{ne} \quad (11)$$

$$\text{Untuk } \lambda_l > 0,667, M_{nl} = \left[1 - 0,2 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} \right] \times \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} \times M_{ne} \quad (12)$$

$$M_{crl} = L_F \times S_f \times F_y \quad (13)$$

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{crl}}} \quad (14)$$

Keterangan:

- L_F : koefisien faktor pengali
- M_{crl} : momen tekuk lokal elastis (kNm)
- M_{nl} : momen akibat tekuk lokal (kNm)

- M_{ne} : momen akibat tekuk global (kNm)
 S_f : modulus elastis penampang baja *cross-section* yang tidak tereduksi relatif terhadap serat ekstrim pada pelelehan pertama (mm³)
 λ_l : faktor kelangsingan

Nilai kekuatan lentur dipilih dari nilai minimal yang diperoleh dari ketentuan 3.1 dan 3.2.

3.3. Berdasarkan Tekuk Lokal berinteraksi dengan Tekuk Global (metode DSM) menurut Jonathan (2022) dan Priestley (2022)

Berdasarkan usulan Jonathan (2022) dan Priestley (2022) maka persamaan (11) dan dimodifikasi menjadi persamaan (15):

$$M_{nl} = (1,63 - 0,95\lambda_l) \times M_{ne} \quad (15)$$

Evaluasi yang dilakukan oleh Jonathan (2022) dan Priestley (2022) menunjukkan hasil modifikasi persamaan dapat menjadikan nilai kekuatan lentur lebih optimal dengan faktor keamanan yang memenuhi ketentuan minimal.

BAB IV PENUTUP

Dokumen ini memberikan petunjuk perhitungan kekuatan lentur balok baja nirkarat canai dingin pada kondisi temperatur 22-900°C. Petunjuk ini disusun untuk sebagai pedoman praktis bagi perencana struktur, terutama struktur baja nirkarat. Maka dari itu, penyusun pedoman ini berharap agar dapat menjadi teknologi tepat guna di dunia konstruksi. Ucapan terima kasih disampaikan kepada para kontributor dokumen ini yaitu Sdr Kelsen Andrian Priestley, S.T. dan Jonathan, S.T. yang telah menyelesaikan tugas akhir sarjana tekniknya pada semester ganjil 2022-2023. Selain itu, para penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Tarumanagara yang telah memberikan hibah penelitian berjudul *Behavior and Design of Cold-Formed Stainless Steel (CFSS) RHS Perforated Beams at Elevated Temperatures* sehingga dokumen ini bisa diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- ASCE-8. (2021). *Draft Specification for The Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members. SEI/ASCE8-xx*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Chen, J., & Young, B. (2006). Stress-Strain Curves For Stainless Steel At Elevated Temperatures. *Engineering Structures*, 28, 229-239.
- Chen, Z., Huang, Y., & Young, B. (2022). Design of Cold-Formed Ferritic Stainless Steel RHS Perforated Beams. *Engineering Structures*, 250, 113372.
- Francis, R., & Byrne, G. (2021). Duplex Stainless Steels-Alloys for the 21st Century. *Metals*, 836.
- Huang, Y., & Young, B. (2013). Experimental and Numerical Investigation of Cold-formed Lean Duplex Stainless Steel Flexural Members. *Thin-Walled Structures*, 1-13.
- Huang, Y., & Young, B. (2014). Stress-Strain Relationship Of Cold-Formed Lean Duplex Stainless Steel At Elevated Temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 92, 103-113.
- Huang, Y., Chen, J., He, Y., & Young, B. (2021). Design of Cold-formed Stainless Steel RHS and SHS Beam-columns at Elevated Temperatures. *Thin-Walled Structures*, 1-22.
- Jonathan. (2022). *Desain Kekuatan Balok RHS Berlubang Pada Temperatur Ekstrim Terbuat Dari Cold-formed Austenitic Stainless Steel*. Jakarta: Program Studi Sarjana Teknik Sipil Universitas Tarumanagara.
- Lai, J. K., Shek, C. H., & Lo, K. H. (2012). *Stainless Steel: An Introduction and Their Recent Developments*. U.A.E: Bentham Science.
- Moen, C. D., & Schafer, B. W. (2010). Extending Direct Strength Design to Cold-formed Steel Beams with Holes. *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. 4. St. Louis, Missouri. Retrieved from <https://scholarsmine.mst.edu/isccss/20iccfss/20iccfss-session5/4>
- Oentoeng. (2000). *Konstruksi Baja*. Surabaya: Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Kristen Petra.
- Priestley, K. A. (2022). *Perilaku RHS Lean Duplex Stainless Steel Berlubang Terhadap Kegagalan Lentur Murni Pada Temperatur Ekstrim*. Jakarta: Program Studi Teknik Sipil Universitas Tarumanagara.
- Romli. (2013). Analisis Sifat Mekanis Pengaruh Proses Pengelasan Baja Tahan Karat. *Jurnal Austenit*, 1-14.
- Schafer, B. W., & Adány, S. (2006). Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. *Eighteenth international specialty conference on cold-formed steel structures*. Orlando, Florida.